Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México
Parte 1: estimación energética

• Xiomara González-Ramírez* • Iván A. Hernández-Robles •
Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México
*Autor para correspondencia

• Héctor Barrios-Piña •
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Zapopan, Jalisco, México

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-01

Resumen

González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I. A., & Barrios-Piña, H. (noviembre-diciembre, 2017). Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México. Parte 1: estimación energética. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *8*(6), 5-22, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-01.

En esta primera etapa de la investigación se explora, analiza y estima el potencial energético del oleaje en aguas costeras mexicanas. La estimación del potencial energético undimotriz desarrollado en este trabajo proporciona un panorama preliminar para el diseño de sistemas de generación distribuida, considerados como sistemas oportunos para el desarrollo regional sustentable. Actualmente la tecnología para el uso de energías renovables a partir de fuentes oceánicas es emergente, lo cual la convierte en una alternativa atractiva para la sustentabilidad energética. México está rodeado por dos océanos, lo que le permite contar con un gran recurso natural, económico y energético; su mar territorial se extiende aproximadamente hasta unos 22.2 km (12 millas náuticas) mar adentro a partir de la línea de costa, por lo que es primordial el análisis y la investigación del potencial energético del oleaje en su mar territorial en la búsqueda del aprovechamiento óptimo para la conversión de energía por oleaje (CEO) a eléctrica; así como proporcionar una perspectiva de lugares atractivos para el reto de implementación y diseño óptimo de micro-redes eléctricas. La estimación de potencia y parámetros, como altura significativa y periodicidad del oleaje obtenidos en este trabajo, se utilizan como datos de entrada para el diseño de generadores eléctricos lineales, dispositivos necesarios para la conversión de energía.

Palabras clave: aguas someras, conversión de energía de oleaje, energía undimotriz, micro-redes eléctricas, sustentabilidad energética.

Abstract

González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I. A., & Barrios-Piña, H. (November-December, 2017). Wave energy potential in Mexico's coastal nodes. Part 1: Energy estimation. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 8(6), 5-22, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-01.*

The first stage of this investigation explores, analyzes, and estimates the energy potential of waves on the coast of Mexico. The estimation of the energy potential of waves performed by this work provides a preliminary overview for the design of distributed generation systems, which are considered to be useful systems for regional sustainable development. The current technology that uses ocean sources for renewable energy is emerging, making it an attractive option for sustainable energy. Mexico is surrounded by two oceans, providing it with great natural, economic, and energy resources. Its territorial waters reach approximately 22.2 km (12 nautical miles) into the sea from the coastline, which is why the analsyis and investigation of wave energy potential in its territorial waters is crucial, in order to fully take advantage of it by converting wave energy into electricity. This work also provides a perspective on attractive places for the challenge of implementing and designing electric micro-networks. The estimation of power and parameters such as significant wave height and periodicity, which were obtained by this work, are used as input data to design linear electric generators, needed devices for the conversion of energy.

***Keywords**: Shallower water, wave energy conversion, wave renewable sources, micro-grids, energy sustainability.*

Recibido: 04/11/2016
Aceptado: 15/04/2017

Introducción

El potencial de energía eléctrica a partir de fuentes oceánicas es una de las alternativas que ha despertado mayor interés en los últimos años. El agua contenida en los océanos representa el 97% del total de agua que posee el planeta, además de que 71% de la superficie terrestre está cubierta por agua de mar. El potencial teórico mundial de suministro de energía oceánica que se estima podría aportar esta fuente ronda los 82 950 TWh anualmente, destacando la maremotermia con 53% y undimotriz con 36%, mareomotriz 9%, y el aprovechamiento del gradiente salino 2% (Sener, 2012). El interés en la investigación y tecnología de las energías renovables va en aumento en los países latinoamericanos, sin embargo su avance no es comparable con lo desarrollado por países como China, Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Alemania, India, Nueva Zelanda y Dinamarca (REN21, 2015, 2016; Frankfurt School, 2016; García, Castro, & Cerdá, 2012). La necesidad de obtener energía eléctrica usando recursos diferentes a los convencionales con el objetivo de mejorar el medio ambiente, la salud y la economía ha llevado a investigadores en México (González, Barrios, & Hernández, 2016; Hernández, Segundo, Gonzalez, Luna, & Juarez, 2017; López, Silva, & Mendoza, 2011) a incursionar activamente en esta temática, no sólo desde el punto de vista de la investigación, desarrollo y aplicación de las nuevas tecnologías de generación energética sino también rompiendo paradigmas, viéndolos desde el punto de vista comercial y de negocio con la actual reforma energética del país.

Energías renovables en México

La inversión en energías limpias en México aumentó en mil 600 millones de dólares en 2015 respecto al año anterior. Las inversiones en proyectos de producción de energía limpia en México rompieron récord en 2015, para alcanzar un monto de tres mil 900 millones de dólares (MacDonald, 2016). La inversión en eólica terrestre más grande del mundo en 2015 fue la del portafolio de Nacional Financiera (Nafin) en México de 1.6 GW y unos 2 200 millones de dólares (MacDonald, 2016). Además las inversiones incluyeron un aumento en la capacidad de generación de 64 GW en eólica y de 57 GW en energía solar, lo que constituye un aumento de 30% en estos rubros energéticos (REVE, 2016). Sin embargo, a pesar de que ha existido una gran inversión en estas fuentes energéticas, estadísticamente las energías oceánicas aún no se proyectan ni como capacidad instalada adicional al 2029 y tampoco como generación de energía eléctrica de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2015-2029 (Sener, 2015); en la prospectiva para 2029 en generación de energías renovables es notable un aumento en un 128.86% de su participación con respecto a la generación del año 2014. La meta del gobierno federal es alcanzar una participación de 35% en la generación total de electricidad con tecnologías sustentables para el año 2024 (Sener, 2012). Para el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) mexicano, un suministro de energía eléctrica debe considerar sólo energías con un alto grado de maduración tanto tecnológica como comercial, sin embargo no se debe dejar a un lado la investigación y el aprovechamiento de otros tipos de energías renovables, como el potencial energético undimotriz que se propone en este trabajo, con la finalidad de diseñar micro-redes sustentables para zonas aisladas donde el SEN no llega, ya sea por falta de infraestructura o recursos económicos. A pesar de que México actualmente no cuenta con desarrollos piloto o comerciales de centrales de generación por las diferentes formas de energía oceánica, algunos estudios hechos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) indican que existen zonas con alto potencial para su aprovechamiento en el país, principalmente de la energía mareomotriz, en la región del Alto Golfo de California. Se cree que en un área de embalse de 2 590 km^2 se podría disponer de una potencia máxima instalada de 26 GW, con una producción de 23 000 GWh/año (Sener, 2012). En este trabajo se explora y analiza el potencial energético

• ISSN 0187-8336

del oleaje de algunas zonas marítimas, para la implementación a futuro de convertidores de energía undimotriz.

Generación distribuida por energía undimotriz

En la actualidad se tiene gran interés en el desarrollo e inversión por energía undimotriz. De acuerdo con el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) existen 226 desarrolladores de energía undimotriz en todo el mundo. Entre los principales proyectos de desarrollo undimotriz destacan los de EUA, Reino Unido y Australia (EMEC, 2016). Hay algunos parques de distribución de energía (DE) de las olas, como la planta de energía de las olas Sotenäs, situado en la costa occidental de Suecia, conectado a la red nacional con 1 MW en 2016 (FORTUM, 2015; OWET, 2016). El proyecto Sotenäs se centra principalmente en los sistemas de producción en masa; casos orientados a los recursos del océano para micro-redes son menos comunes. Carnegie Wave Energy, compañía de energía undimotriz de Australia, y la empresa de energía de propiedad en Australia por el gobierno Western Power colaboraron juntos en la creación de la primera isla micro-red del mundo con energía undimotriz: el Garden Island Micro-Grid Project (GIMG), el cual fue el primer proyecto de micro-red renovable con energía undimotriz integrada para conectarse a una red eléctrica; actualmente produce 1 MW o energía suficiente para abastecer a unos 2 000 a 3 000 hogares (Carnegie Wave Energy Limited, 2017; Parkinson, 2017; Piesse, 2015).

En las cuatro vertientes mexicanas del Golfo de México y Caribe, Pacífico Tropical, Golfo de California y Costa Occidental existen diferencias muy evidentes en los estados de mar; ello se debe a la posición del país, que se encuentra en medio de dos océanos con características oceanográficas y atmosféricas muy opuestas, influenciados en particular por procesos globales. Por tanto, este estudio se centra en el potencial energético del oleaje como generador distribuido para sustentar micro-redes o áreas locales de zonas interconectadas o aisladas, en donde no se necesite un potencial tan alto como lo requiere un gran sistema eléctrico de potencia. Las áreas y nodos atractivos para el estudio realizado se seleccionaron de acuerdo con los índices de disponibilidad energética nacional.

Energía en México

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) llevó a cabo la Encuesta Intercensal en 2015 (INEGI, 2015a), la cual indicó que 98.72% de las viviendas de México dispone de energía eléctrica y el restante 1.02% no cuenta con energía eléctrica. Entre 2000 y 2010 el porcentaje de viviendas con servicio de energía eléctrica se incrementó 2.8 puntos; en cambio, de 2010 a 2015 alcanzó 0.9 puntos (INEGI, 2015b). Con base en esto es posible suponer que las viviendas que *aún no disponen de este servicio probablemente se encuentran en lugares de difícil acceso*. De acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2010), y según la Encuesta Intercensal 2015 realizada por el INEGI (INEGI, 2015a), en el cuadro 1 se describe la disponibilidad del servicio de energía eléctrica en viviendas particulares habitadas, específicamente en los estados que contienen zonas costeras. Se describe el porcentaje de la *disponibilidad de energía eléctrica* (Dis.), la *No disponibilidad de energía eléctrica* (No dis.), y las viviendas *No especificadas* (No esp.). Es importante indicar que la característica *No disp.* es global, sin considerar que la vivienda con esta característica está cerca o muy alejada de la costa dentro de ese estado costero; identificar cada municipio costero con la característica *No disp.* está fuera del alcance de este trabajo, pues se enfoca a un estudio de la factibilidad del potencial energético. En una posible etapa donde exista financiación para implementación de una planta de generación distribuida por oleaje será necesario el estudio por municipio costero.

Para la selección de los puntos de análisis, este trabajo consideró los estados de la república mexicana con salida al mar y con características de *No disponibilidad de energía eléctrica* para explorar su potencial energético por oleaje. Los

ISSN 0187-8336 •

estados tomados en cuenta bajo este criterio son Campeche, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Colima y Nayarit.

Golfo de México

1. **Campeche**: su cobertura en acceso a la energía eléctrica no subió de 39% en cinco años.
2. **Veracruz**: tiene un porcentaje medio de 1.84% de viviendas sin acceso al servicio.

Océano Pacífico

1. **Oaxaca**: estado con mayor índice de viviendas sin energía eléctrica (3.11%).
2. **Guerrero**: segundo estado con mayor índice de viviendas sin energía eléctrica (2.48%).
3. **Chiapas**: tercer estado con mayor índice de viviendas sin energía eléctrica (2.33%).
4. **Colima**: estado con menos cobertura en acceso a la energía eléctrica en cinco años (27.63%).
5. **Nayarit**: cuarto estado con mayor índice (2.07%) de viviendas sin energía eléctrica y tercero con menos cobertura (32.02%) de este servicio en cinco años.

Este trabajo toma en cuenta los datos e índices anteriores para seleccionar los nodos en los estados mexicanos que presentan salida al mar, con el fin de explorar y analizar su potencial energético para la conversión de energía por oleaje (CEO).

Ampliación y modernización de la red eléctrica

El Centro Nacional de Control de Energía (Cenace), en su propuesta del Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Mayorista 2015-2029 (Cenace, 2015), ilustra en las figuras 1a y 1b los límites de transmisión para 2015 y 2020, respectivamente; para 2020 se muestra un incremento

Cuadro 1. Disponibilidad de energía eléctrica en viviendas de los estados con costa entre 2010 y 2015.

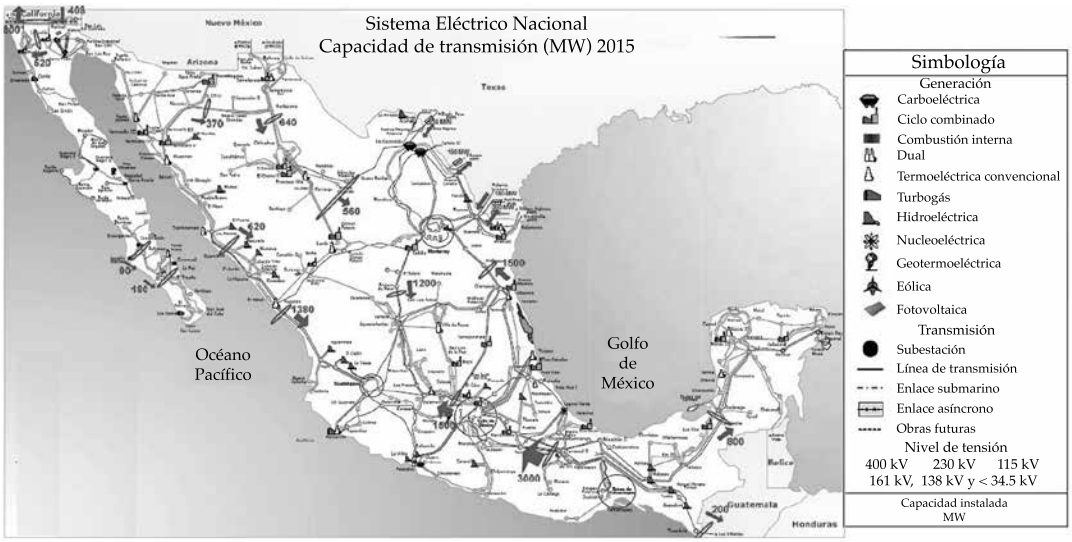
Viviendas particulares habitadas								
Estado	**2010**				**2015**			
	Total de viviendas	**Dis. (%)**	**No dis. (%)**	**No esp. (%)**	**Total de viviendas**	**Dis. (%)**	**No dis. (%)**	**No esp. (%)**
Baja California	853 254	98.52	1.11	0.37	961 553	99.29	0.68	0.03
Baja California Sur	174 441	96.65	3.10	0.25	208 972	98.44	1.39	0.18
Campeche	211 555	96.75	3.06	0.19	244 299	98.08	1.88	0.04
Colima	177 672	99.04	0.78	0.18	204 949	99.38	0.56	0.05
Chiapas	1 072 239	95.87	3.68	0.45	1 238 565	97.54	**2.33**	0.13
Guerrero	804 801	95.31	4.18	0.50	894 621	97.34	**2.48**	0.18
Jalisco	1 801 306	98.95	0.83	0.22	2 058 775	99.55	0.37	0.08
Michoacán	1 066 061	97.98	1.75	0.27	1 191 405	98.97	0.91	0.12
Nayarit	288 522	96.86	3.04	0.09	332 279	97.87	**2.07**	0.06
Oaxaca	934 055	94.35	5.23	0.42	1 042 941	95.03	**3.11**	1.86
Quintana Roo	362 762	96.18	2.05	1.77	440 663	98.76	1.19	0.05
Sinaloa	709 748	98.43	1.23	0.34	805 854	99.27	0.64	0.08
Sonora	703 956	97.89	1.90	0.21	812 567	98.01	1.34	0.65
Tabasco	558 882	98.39	1.37	0.24	646 059	99.32	0.57	0.11
Tamaulipas	867 935	96.97	1.77	1.26	986 886	98.79	0.95	0.26
Veracruz	1 982 612	96.64	3.15	0.21	2 250 001	98.08	1.84	0.08
Yucatán	502 948	97.36	2.02	0.62	564 613	98.62	1.31	0.08

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VIII, núm. 6, noviembre-diciembre de 2017, pp. 5-22

• ISSN 0187-8336

significativo en obras de transmisión que están influenciadas por la incorporación de centrales eléctricas en el periodo 2015-2020, específicamente en las redes asociadas con los proyectos de centrales eléctricas en el norte, noroeste y sureste del país (Cenace, 2015). El incremento en la capacidad de transmisión se traduce en la eliminación de congestiones en la red, en beneficio del mercado eléctrico mayorista y de la confiabilidad del SIN (Sistema Interconectado Nacional) (Cenace, 2015).

Como se puede visualizar, la ampliación y modernización de la red eléctrica principal en primera instancia no llega directamente a las áreas que se han elegido como zonas costeras aisladas o sin acceso a la energía eléctrica, tampoco la construcción de nuevas centrales eléctricas está planeada para estas áreas; por último se puede ver que en esta ampliación aún no tendrían contemplado como fuentes de energías renovables a las fuentes oceánicas, como es el caso del oleaje.



a)

b)

Figura 1. Sistema eléctrico nacional, capacidad de transmisión (MW) (Cenace, 2015): a) 2015; b) 2020.

ISSN 0187-8336 •

Lo anterior proporciona un argumento válido para analizar estas áreas como futuras fuentes de energía por oleaje, y a partir de ello planear y diseñar micro-redes eléctricas que ayuden a distribuir energía a comunidades aisladas y considerarlas para integrarse al SIN.

Áreas de estudio

Este trabajo se enfoca en la exploración y análisis del potencial energético undimotriz en las costas del Pacífico tropical mexicano y el Golfo de México. El trabajo proporciona un estimado del potencial del oleaje, con el fin de evaluar la factibilidad de producción de energía undimotriz y tener un panorama de la potencia eléctrica promedio con la que se diseñará el dispositivo de conversión de energía, en este caso un generador eléctrico lineal (GEL); este panorama preliminar de potencia eléctrica también servirá para una perspectiva de la micro-red que se puede diseñar y el equipo necesario a implementarse para el control y estabilidad de energía; todo con el fin de lograr la energización de zonas costeras aisladas o como reserva de energía en áreas locales cercanas a tal fuente de energía. Las estimaciones económicas para la producción de energía undimotriz es un tema de gran importancia, pero no se abordará en este trabajo.

El área de estudio se encuentra localizada principalmente (por su amplitud) en la zona costera del océano Pacífico, también se consideraron zonas en el Golfo de México (ver figuras 2a y 2b) con un total de 25 nodos. En la parte del océano Pacífico se tiene una línea de costa de estudio de unos 1 000 km, y en el lado del Golfo de México de unos 894 km. El estudio realizado contempla aguas someras y aguas profundas, según la clasificación del oleaje por profundidad (h) y longitud de onda (λ), la cual contempla los siguientes criterios (Ippen, 1966; WMO, 1998): a) aguas someras, $h \leq \lambda/20$; b) aguas intermedias, $\lambda/2 > h > \lambda/20$; c) aguas profundas, $h \geq \lambda/2$.

Modelado y extracción de energía undimotriz

Para la estimación del potencial de energía de las olas hay que considerar que en principio el oleaje real es una superposición compleja de numerosos trenes de olas no regulares con distintos valores de periodo, altura y dirección, elevando la complejidad para la emulación y simulación del dispositivo de conversión GEL. Las olas y su comportamiento son el resultado de los efectos del viento en el mar; por lo tanto, la energía del oleaje depende del viento y es una fuente de energía intermitente. Para una onda sinusoidal de periodo ($1/f$), la energía de las olas se transporta con una velocidad de energía igual a la velocidad del grupo de olas $\boldsymbol{c}_g(gT/4\pi)$. Para una ola de mar real, el nivel de potencia puede expresarse en términos del espectro de ondas como (Falnes, 2007):

$$P_w = \rho g \int_0^\infty c_g(f) S(f) df = \frac{\rho g^2 T_e H_s^2}{64\pi} \qquad (1)$$

Donde ρ es la densidad de la masa del agua de mar (1 025 kg/m^3); g, la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2); Te, el periodo de energía; Hs, la altura significante de la ola; $c_g(f)$, la celeridad de grupo, indicando la velocidad del grupo de olas, y $S(f)$ es el espectro de olas sin tener en cuenta su dirección de las olas. Esta última describe cuantitativamente cómo las diferentes frecuencias de onda f contribuyen a la energía.

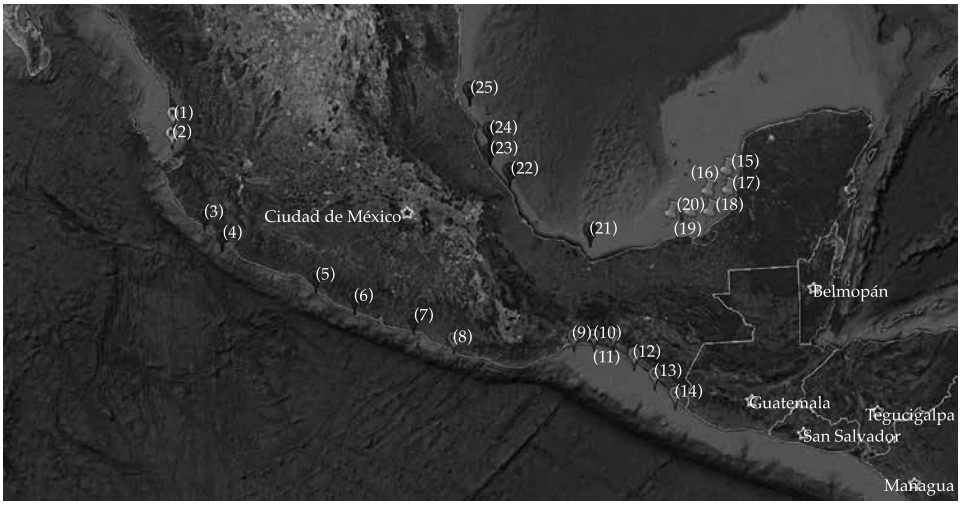
Máxima potencia absorbida por un cuerpo asimétrico

Si una onda plana incidente sinusoidal con un nivel de densidad de potencia de $P_W = \boldsymbol{c}_g E$, siendo E la densidad de energía promedio (González *et al.*, 2016), interfiere con un cuerpo asimétrico palpitante (o de revolución), este cuerpo generador de ola a lo sumo puede absorber una potencia dada por (Falnes, 2004, 2007):

$$P_{\text{máx}} = \frac{\lambda}{2\pi} P_w \qquad (2)$$

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VIII, núm. 6, noviembre-diciembre de 2017, pp. 5-22

• ISSN 0187-8336



a)

b)

Figura 2. Áreas consideradas: a) ubicación de los 25 nodos de estudio; b) estados de las zonas costeras de estudio.

La cual corresponde a una interferencia destructiva óptima, es decir, que el ancho máximo de absorción de un dispositivo de punto palpitante es teóricamente igual a la longitud de onda λ dividida por 2π (Falnes, 2004; Falnes & Hals, 2012).

Datos de oleaje

Para este estudio se tomó la base de datos de ERDDAP (Environmental Research Division's Data Access Program), el cual es un servidor de datos que proporciona de una manera simple y consistente un subconjunto de conjuntos de datos científicos en formatos de archivo comunes. En este servidor, la Universidad de Hawái fue la que proporcionó los datos oceanográficos. Implementaron un modelo de escala global de siete días a través del WaveWatch III (WW3) (Tolman, 2009), con un pronóstico de cinco días cada hora, con una resolución de aproximadamente 50 km o 0.5 grados. El modelo global es

ISSN 0187-8336 •

forzado con el sistema mundial de predicción (GFS) de vientos de la NOAA/NCEP. Dicho modelo está diseñado para capturar las olas del océano a gran escala y proporcionar condiciones de contorno espectrales para el modelo regional WW3 Hawái. Aunque se ha hecho un esfuerzo considerable para poner en práctica todos los componentes del modelo de manera exhaustiva, correcta y precisa, son posibles algunas fuentes de error (ERDDAP, 2016; Rogers, Dykes, Wang, Carroll, & Watson, 2012), las cuales pueden deberse, entre otras, a la estadística, a la resolución del modelo de predicción o a la variabilidad del viento, pero para este trabajo no afectan a las estimaciones. Como tal, estos datos se toman como un aproximado del comportamiento del oleaje para los 25 nodos de estudio de las costas mexicanas.

Base de datos y puntos de estudio

Los nodos específicos donde se evaluó el potencial se visualizan en la figura 2a. Cabe mencionar que el WW3, al tener una resolución de unos 50 km o 0.5 grados, restringe el tener o tomar un mayor número de puntos cercanos a la costa, evitando lograr un mayor panorama en este estudio. En el cuadro 2 se describe la *información geográfica* y la *depuración de datos* obtenidos por cada uno de los nodos. En la *información geográfica* se indica a qué estado pertenece, municipio o localidad cercana, sus coordenadas geográficas (latitud, longitud), la distancia a la costa y la profundidad del mar; estos dos últimos parámetros son considerados importantes para la instalación de los dispositivos convertidores de energía undimotriz. Los datos de distancia a la costa y la profundidad del mar (batimetría) se tomaron con ayuda del programa de batimetría de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2016) y de Google Earth (Google Earth, 2016).

El periodo de estudio abarca unos seis años, desde noviembre de 2010 hasta mayo de 2016. En la *depuración de datos*, por cada nodo se ha examinado la existencia de datos incorrectos, ya sea a causa de una mala medición o por una incorrecta captura de información, eliminando el dato incorrecto y, a su vez, sus datos asociados. En el cuadro 2 se describe de esta manera el *Total de datos*, el cual corresponde al 100% de los datos inicialmente obtenidos; los *Datos incorrectos*, como el total de datos que presentaban alguna incoherencia o imprecisión en su valor, y que por tanto fueron seleccionados y eliminados de la base de datos inicial; los *Datos correctos* son los datos finales después de la eliminación de los datos incorrectos, y el *% aceptado* corresponde al porcentaje de los datos correctos con respecto a los datos originales, y por tanto son los que se han usado en este estudio. En resumen, en el proceso de depuración de datos se han eliminado en promedio 4 542 datos incorrectos, obteniéndose para los 25 nodos un promedio de 96.82% de porcentaje aceptado de datos, lo cual permite que sean considerados para el estudio. Cabe mencionar que para el análisis del potencial se han omitido los valores extremos, pues muchos de ellos pudieran corresponder a tormentas o simplemente son valores atípicos; esto, para permitir una mejor visualización de los datos que se presentan con mayor frecuencia.

Análisis y resultados de la energía de las olas

Se describen y analizan las variables y parámetros que permitieron tener un panorama de las condiciones de oleaje y su potencial energético.

Distribución espacial y frecuencias de dirección

La potencia por frente de ola (kW/m) media de las olas en las 25 localidades se muestra en la figura 3. En esta figura se pueden distinguir cuatro zonas con nivel de potencia de ola diferentes y superiores: Oaxaca (nodos 8-10), con potencias de ola media anual superiores a 10 kW/m, su rango de potencia va desde los 9.899 hasta 10.460 kW/m; Guerrero (nodos 5-7), con potencias de ola media anual superiores a 10 kW/m, su rango de potencia va desde los 9.496 hasta 10.334 kW/m; Colima (nodos 3-4), su

• ISSN 0187-8336

Cuadro 2. Datos de los puntos de estudio.

Información geográfica							Depuración de datos			
#	Estado	Municipio/rel. cercano	Ubicación		Distancia a la costa (km)	Profundidad del mar (m)	Total de datos	Datos correctos	Datos incorrectos	% aceptado
			Lat.	Long.						
1	Nayarit	San Blas	21° 30′ N	105° 30′ O	15	33	143 055	141 585	1 470	98.97%
2		San Francisco	21° N	105° 30′ O	14	105	143 559	142 173	1 386	99.03%
3	Colima	Peña Blanca	19° N	104° 30′ O	15	293	143 271	141 888	1 383	99.03%
4		San Juan de Alima	18° 30′ N	104° O	36	1297	143 559	142 173	1 386	99.03%
5	Guerrero	Barra de Potosí	17° 30′ N	101° 30′ O	7	83	143 559	142 152	1 407	99.02%
6		Llano real	17° N	100° 30′ O	10	295	143 055	141 633	1 422	99.01%
7		Copala	16° 30′ N	99° O	8	130	143 055	141 630	1 425	99.00%
8	Oaxaca	Santa María Chicometepec	16° N	98° O	12	148	143 271	141 888	1 383	99.03%
9		San Mateo del Mar	16° N	95° O	22	82	143 271	142 572	699	99.51%
10		Aguachil	16° N	94° 30′ O	20	40	143 271	142 872	399	99.72%
11	Chiapas	Tonalá	16° N	94° O	500 m - 15 km	12	143 559	142 185	1 374	99.04%
12		Pijijiapan	15° 30′ N	93° 30′ O	20	52	142 263	140 895	1 368	99.04%
13		La Encrucijada	15° N	93° O	25	31	143 055	141 684	1 371	99.04%
14		Tapachula	14° 30′ N	92° 30′ O	24	34	142 263	140 901	1 362	99.04%
15	Campeche	Campeche	20° N	91° O	46	14	142 707	126 519	16 188	88.66%
16		Champotón	19° 30′ N	91° 30′ O	67	29	142 767	129 663	13 104	90.82%
17			19°30′ N	91° O	34	11	142 839	124 230	18 609	86.97%
18		Carmen	19° N	91° 30′ O	17	13	142 263	132 243	10 020	92.96%
19			19° N	92° O	35	17	142 695	133 755	8 940	93.73%
20			19° N	92° 30′ O	40	28	142 263	131 568	10 695	92.48%
21	Veracruz	San Andrés Tuxtla	18° 30′ N	94° 30′ O	30	79	143 559	138 525	5 034	96.49%
22		Lechuguillas	20° N	96° 30′ O	8	47	143 271	140 157	3 114	97.83%
23		Papantla	20° 30′ N	97° O	3	11	143 271	140 271	3 000	97.91%
24		Tuxpan	21° N	97° O	30	46	143 271	139 554	3 717	97.41%
25		Ensenada de Mangles	22° N	97° 30′ O	21	52	143 559	140 202	3 357	97.66%

potencia de ola media anual está alrededor de los 9.7 kW/m y su rango de potencia va desde los 8.838 hasta 10.722 kW/m, y Chiapas (nodos 11-14), con potencias de ola media anual alrededor de los 8.4 kW/m, con un rango de potencia que va desde 7.043 hasta 9.880 kW/m.

Un factor que se debe considerar es la dirección de las olas y cómo los nodos de estudio están expuestos. La distribución direccional de energía de las olas es importante para los dispositivos de absorción no puntuales (Sierra, Mösso, & González, 2014). En las figuras 4a y 4b se muestra el porcentaje del promedio anual de las alturas significativas (H_s) en las áreas de estudio, en el océano Pacífico y el Golfo de México, respectivamente, distribuidas en diferentes direcciones de acuerdo con las olas que llegan a cada punto. En los puntos correspondientes al área del océano Pacífico se encuentra que la mayor frecuencia de dirección del oleaje, un 78.06%, se dirige hacia las direcciones sur y suroeste (SO), es decir, entre los 205 y 215°;

ISSN 0187-8336 •

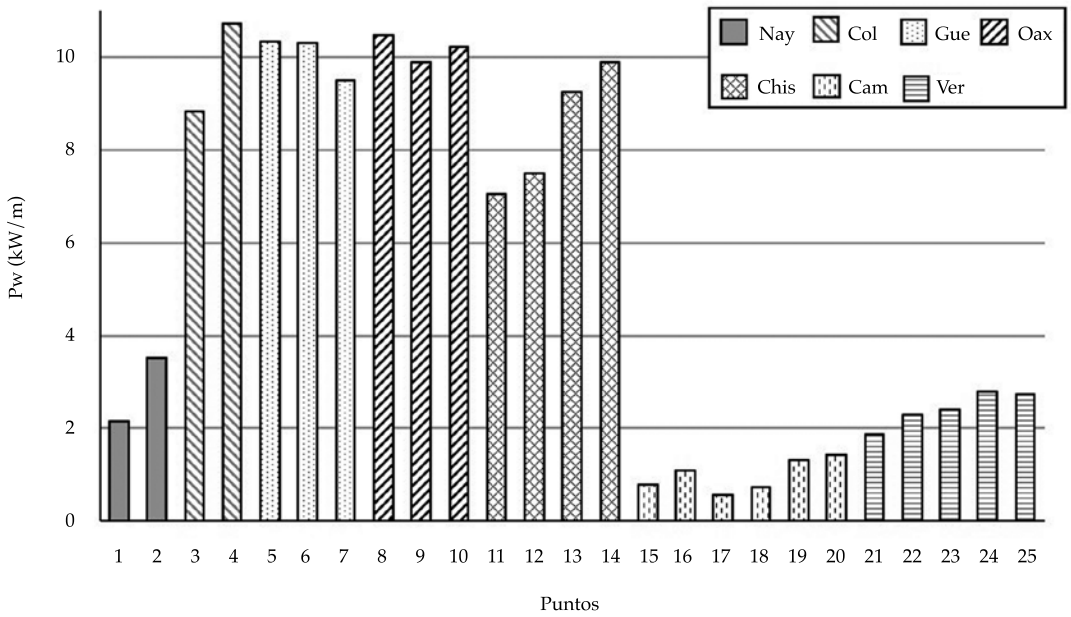


Figura 3. Potencia por frente de ola (kW/m) media anual en los puntos de estudio.

con respecto a la altura significativa de la ola *Hs*, estas áreas presentan en su mayoría alturas entre 1 y 1.5 m, es decir, con frecuencias de 6.79% entre los 185 y 195°; 59.11% entre los 195 y 205°, y de 78.06% entre los 205 y 215°, y en porcentajes más bajos alturas inferiores a 0.5 m, con una frecuencia de 13.78% entre los 215 y 225°. Esta frecuencia de dirección permite que tales puntos sean apropiados para el despliegue de dispositivos de conversión de energía, proporcionando en promedio anual 9.6 kW/m de potencia por frente de ola, con excepción de los puntos correspondientes al estado de Nayarit (Nay), la cual presenta mayor variación en dirección y alturas bajas, tal como se ilustra en la figura 4a.

En los puntos correspondientes al área del Golfo de México, las características difieren mucho con respecto a la zona del Pacífico. Se puede encontrar que la dirección del potencial del oleaje no tiene un patrón o una dirección dominante como en el caso anterior y esto tiene que ver con la parte geográfica del Golfo, el cual es un disipador de energía del oleaje, como se observa con las alturas significativas relativamente bajas entre 0.5 y 1 m. En la figura 4c se ilustran las rosas de oleaje por área para una mayor comprensión.

Variabilidad temporal y potencia por frente de ola (kW/m)

En esta sección se analizan las variaciones mensuales y estacionales de nivel de potencia por frente de ola de las zonas del océano Pacífico y el Golfo de México. Para calcular el potencial energético de conversión de las olas es importante conocer la batimetría de las profundidades de operación para cada tecnología. Los dispositivos que actualmente están operando funcionan a diversas profundidades desde los 15 hasta los 40 metros como máximo, otros son flotantes y hay otros basados en tierra, los cuales son instalados en una escollera natural o artificial en la línea de costa. La figura 5a muestra la potencia promedio por frente de ola estacional en las siete áreas de estudio. En esta gráfica se puede visualizar que en las áreas

• ISSN 0187-8336

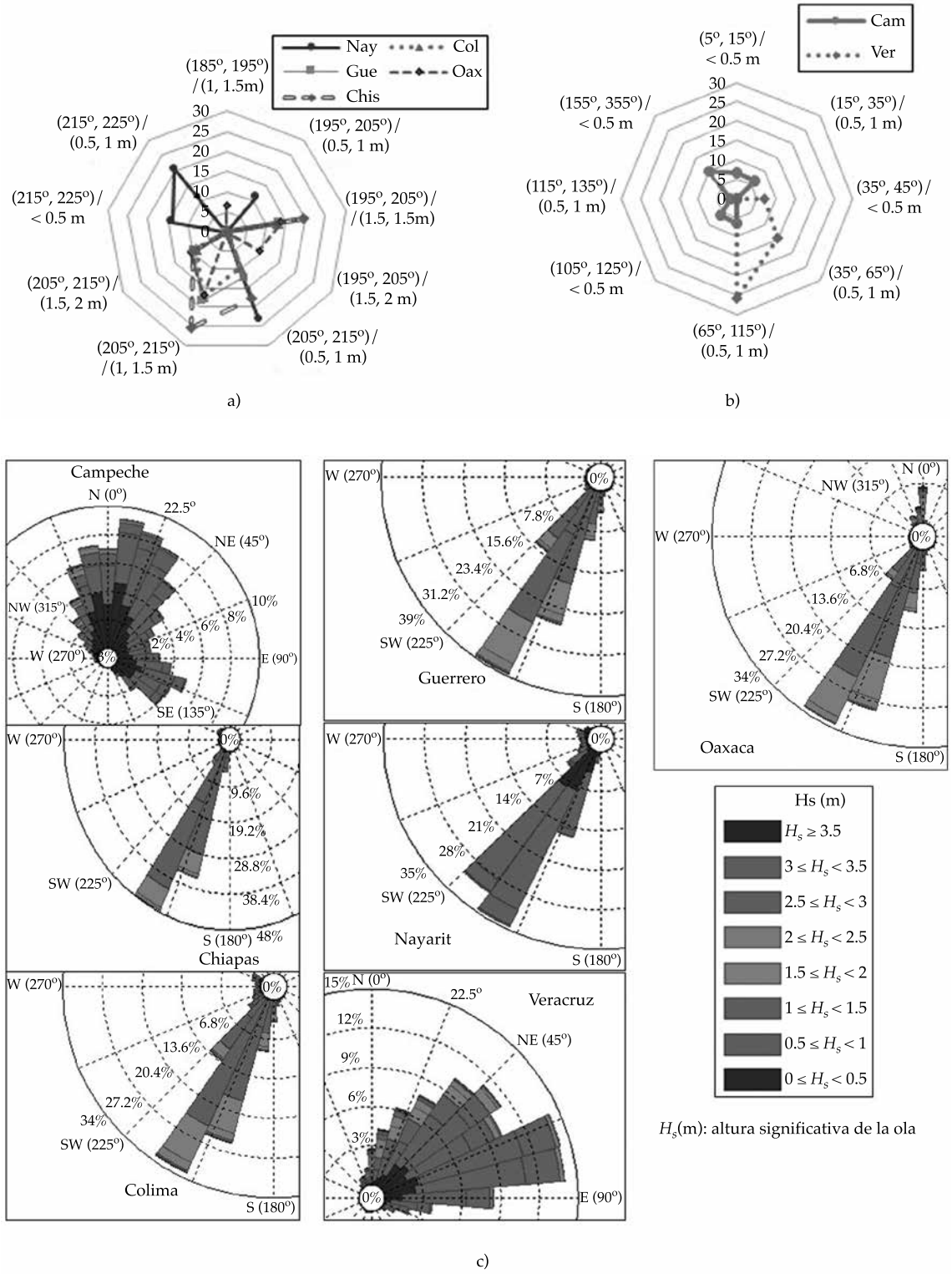


Figura 4. Dirección promedio anual del oleaje con respecto a la altura significativa *Hs*(*m*): a) diagrama radial del océano Pacífico; b) diagrama radial del Golfo de México; c) rosas de oleaje.

ISSN 0187-8336 •

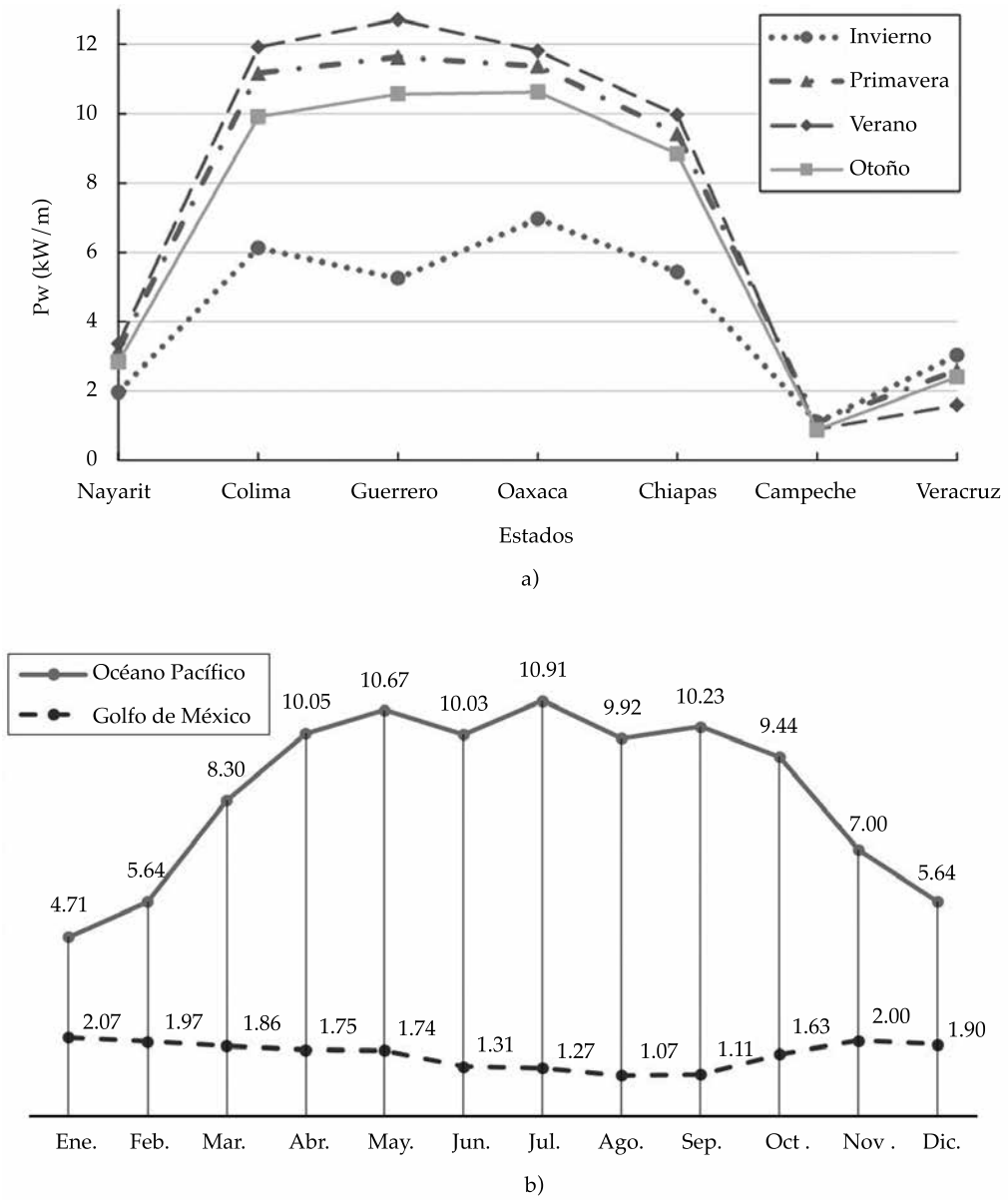


Figura 5. a) Promedio estacional del nivel de potencia de las olas (kW/m) en las áreas de estudio; b) promedio mensual de potencia de las olas (kW/m) para las zonas del océano Pacífico y el Golfo de México.

correspondientes al Golfo de México, es decir, Campeche (Cam) y Veracruz (Ver), en cualquier estación del año, el promedio estacional indica valores muy bajos de flujo de energía undimotriz, y en general presentan poca variación de una estación a otra; sin embargo, a diferencia de las otras áreas ubicadas en el lado del océano Pacífico, se observa un mayor valor de potencia en casi todos los otros cinco estados, es decir, Nayarit (Nay), Colima (Col), Guerrero (Gue), Oaxaca (Oax) y Chiapas (Chis), presentando una menor intensidad de potencia en invierno. En general se aprecia mayor intensidad de potencia en verano y primavera, específicamente en los estados de Oaxaca, Guerrero, Colima y Chiapas, con un promedio estacional de 10.20, 10.04, 9.78,

• ISSN 0187-8336

y 8.42 kW/m, respectivamente, lo cual está relacionado evidentemente con la batimetría y las condiciones oceanográficas sobresalientes de estos puntos, como se observó en las frecuencias de direcciones.

En la figura 5b se ilustra el nivel promedio mensual de potencia de las olas (kW/m), visto desde las zonas del océano Pacífico y el Golfo de México. En las áreas del Pacífico, los niveles de potencia por frente de ola con mayor intensidad se presentan a mediados y finalizando la primavera (marzo-mayo); los valores más altos se presentan durante el verano (junio-agosto), con su mayor pico en julio, y se mantienen hasta el otoño (septiembre-noviembre), pero en noviembre disminuye y sigue bajo durante todo el invierno (diciembre-febrero). Para el caso de las zonas del Golfo de México se encuentra un comportamiento totalmente diferente al del Pacífico. Aquí, en general, los niveles de potencia por frente de ola son mucho más bajos y dentro de ellos los que presentan mayor intensidad se encuentran en invierno, a inicios de primavera y finalizando el otoño.

Potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico

Uno de los principales desafíos que se presentan en la captación de la energía del oleaje son los procesos que condicionan su desplazamiento y conversión, por ello es de suma importancia encontrar zonas propicias para la captación, evitando regiones de alta disipación natural de energía.

Para que un convertidor de energía de olas pueda capturar la totalidad de su energía, por lo general se encuentra para una frecuencia de onda, y cada dispositivo presenta su propia dependencia de la frecuencia. Algunos dispositivos alcanzan una eficiencia de más de 100% para una frecuencia específica de resonancia, debido a que se comportan como absorbentes de energía puros, es decir, sin considerar pérdidas por acoplamientos entre otros componentes en la conversión de energía. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la eficiencia o el ancho de captura es considerablemente inferior al 100% en cualquier frecuencia y de manera ponderada sobre un rango de frecuencias, la eficiencia promedio puede ser por lo general de 25 a 35% (Duckers, 2000). No obstante, en la actualidad existe un gran número de proyectos en diversas etapas de desarrollo, y nuevos conceptos y tecnologías superan a los que están siendo abandonados (Falcão, 2010). El uso de la energía de las olas implica una cadena de procesos de conversión de energía. Cada uno de ellos se caracteriza por su eficiencia, así como las limitaciones que introduce y tienen que ser controladas. De especial relevancia es el proceso hidrodinámico de absorción de energía del oleaje (Falcão, 2010).

Para representar los diferentes movimientos, o grados de libertad, que puede tener un cuerpo asimétrico flotante (ver figura 6), se utiliza la siguiente nomenclatura: 1) traslación en el eje *x* (*Surge*): avance del cuerpo, positivo hacia adelante; 2) traslación en el eje *y* (*Sway*): desplazamiento lateral, se considera positivo hacia la izquierda; 3) traslación en el eje *z* (*Heave*): altura del cuerpo, positivo hacia arriba; 4) rotación en el eje *x* (*Roll*): balanceo lateral del cuerpo, positivo es hundir la parte derecha del cuerpo; 5) rotación en el eje *y* (*Pitch*): cabeceo vertical, positivo es hundir la parte de adelante

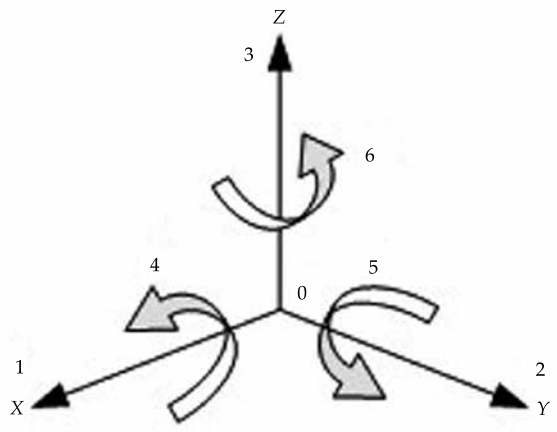


Figura 6. Seis grados de libertad de un cuerpo flotante.

ISSN 0187-8336 •

del cuerpo; 6) rotación en el eje *z* (*Yaw*): cabeceo horizontal del cuerpo, positivo es girar hacia la izquierda. De los seis modos del movimiento oscilatorio o grados de libertad que presenta un cuerpo rígido se ha analizado la potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico para tres diferentes grupos de movimientos: a) un solo grado de libertad: *Heave* o absorbente en el punto de elevación; b) dos grados de libertad: *Surge Pitch*, y/o *Surge-Heave*; c) tres grados de libertad: *Surge-Heave-Pitch*, y/o *Surge-Heave-Sway*. Por simplicidad, en este trabajo se ha calculado la potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico en su forma más simple, es decir, para un cuerpo asimétrico de un solo grado de libertad de traslación en el eje "z" o de movimiento vertical, cuya potencia estimada corresponde a la ecuación (2). En el cuadro 3 se muestra el promedio de la potencia máxima absorbida por mes y su promedio anual para los 25 nodos seleccionados.

Para un dispositivo de forma asimétrica de un solo grado de libertad, los puntos del estado de Campeche obtendrían en conjunto la potencia más baja de absorción, con un promedio anual de 7 kW. Veracruz, al igual que Campeche,

Cuadro 3. Máxima potencia absorbida por un cuerpo asimétrico-*P*máx (kW).

Información geográfica			Mes												Promedio anual
#	Zona	Municipio/rel. cercano	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	Nayarit	San Blas	26	34	56	69	77	71	76	67	69	66	43	35	58
2		San Francisco	146	164	187	216	227	204	221	196	203	200	140	141	187
3	Colima	Peña Blanca	368	476	756	938	982	910	1023	922	938	867	579	456	768
4		San Juan de Alima	216	240	320	378	380	351	390	338	354	356	230	201	313
5	Guerrero	Barra de Potosí	217	288	489	608	645	610	677	598	619	577	390	295	501
6		Llano real	408	537	919	1 151	1 230	1 163	1 284	1 137	1 175	1 093	722	547	947
7		Copala	212	300	545	694	735	691	769	681	707	637	424	312	559
8	Oaxaca	Santa María Chicometepec	277	381	673	843	899	836	932	816	863	780	505	373	681
9		San Mateo del Mar	196	213	355	455	461	421	472	435	397	373	293	215	357
10		Aguachil	148	188	285	345	364	331	365	324	327	328	252	196	288
11	Chiapas	Tonalá	56	73	114	135	145	132	146	130	139	129	93	76	114
12		Pijijiapan	138	180	252	292	309	288	315	276	298	284	221	181	253
13		La Encrucijada	136	179	259	299	324	299	327	291	311	294	214	179	259
14		Tapachula	159	213	309	356	377	343	383	339	364	339	251	208	304
15	Campeche	Campeche	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	3	3	3
16		Champotón	9	9	8	8	8	6	7	7	5	7	8	8	8
17			2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
18		Carmen	5	4	4	4	4	3	3	3	2	4	4	4	4
19			13	12	12	11	11	8	9	8	6	10	12	11	10
20			15	15	14	14	14	11	13	11	9	12	14	13	13
21	Veracruz	San Andrés Tuxtla	50	46	41	32	32	26	26	19	20	35	48	43	35
22		Lechuguillas	46	42	40	37	36	26	24	18	21	36	45	41	34
23		Papantla	21	19	19	19	18	14	12	10	11	17	21	20	17
24		Tuxpan	57	53	51	51	48	34	28	24	29	46	58	56	45
25		Ensenada de Mangles	58	55	54	54	52	37	28	24	34	49	63	60	47

• ISSN 0187-8336

son las zonas con las potencias más bajas del estudio, lo que da evidencia del bajo potencial energético por oleaje que presentan estas zonas del Golfo de México. Por otra parte, en las zonas del océano Pacífico, las potencias son más altas, tres de ellas son dadas por los puntos en conjunto de Oaxaca, Colima y Guerrero, con absorción de potencia promedio anual de 442, 541, y 669 kW, respectivamente, permitiendo la posibilidad de suministrar energía a comunidades locales por medio de micro-redes. Finalizando se tiene que el nodo 6 correspondiente al estado de Guerrero presenta un promedio anual de 947 kW. Es el área o estado en el que mayor potencia de absorción podrá obtenerse por medio de un dispositivo asimétrico de un grado de libertad.

Aplicación de micro-redes eléctricas en los nodos de estudio

De acuerdo con las potencias estimadas como máximas absorbidas por un dispositivo de un solo grado de libertad es posible caracterizar a la micro-red en áreas locales cercanas a las costas de México. La implementación de una micro-red es una posibilidad a mediano o largo plazos. Entonces la estimación de potencia máxima de absorción que se obtuvo del cuadro 3 es el producto preliminar para el diseño de la micro-red eléctrica, también es un indicador para el dimensionamiento del dispositivo generador eléctrico lineal, dispositivo de conversión de energía undimotriz de un solo grado de libertad. El diseño de este dispositivo se desarrolla en la segunda etapa de este estudio.

Normalmente una micro-red opera conectada al sistema eléctrico de potencia, pero con la capacidad de autoabastecerse y operar de forma aislada cuando sea necesario; para aumentar la confiabilidad de suministro de la carga local, otros dispositivos de control y estabilidad energética también deben ser considerados de acuerdo con la potencia estimada. Las micro-redes forman parte del concepto de generación distribuida, y no están gestionadas o controladas de forma centralizada; por lo general manejan una potencia menor a 50 MW, y se conectan a la red de distribución.

Comparación con otros casos de estudio

Otros estudios (González *et al*., 2016; Pérez, 2012) han evaluado el potencial energético undimotriz en las costas mexicanas. En el cuadro 4 se muestra una tabla comparativa entre puntos que indica Pérez (Pérez, 2012) y los puntos que se le acercan geográficamente del trabajo presente; ambos corresponden al estado de Colima. El *Estudio 1* corresponde a este trabajo, con los puntos 3 y 4 en el municipio de Colima, y el *Estudio 2* al de Pérez (2012), con los puntos A y B cercanos al municipio de Manzanillo. El *Estudio 2* utiliza un modelo híbrido de propagación de oleaje WAM-HURAC, propaga el oleaje con el modelo REFDIF y obtiene la altura de ola unitaria y el potencial energético en una línea de batimetría de 20 metros. La comparación de los nodos analizados con coordenadas relativamente cercanas verifica que la estimación realizada del potencial energético en este trabajo presenta resultados similares a los estimados con otro método de análisis (Pérez, 2012).

Cuadro 4. Comparación con otro caso de estudio.

Estudio	Océano Pacífico			
	Punto	**Dirección oleaje**	**Altura *Hs*(m)**	**kW/m anual**
1	Colima (3)	(205º, 215º)	(1, 1.5)	8.838
	Colima (4)		(1, 1.5)	10.722
2	Manzanillo (A)	292.5º	1.5	< 2.5 y 8 (0.5)
	Manzanillo (B)		1.5	≤ 10 (0.5)

ISSN 0187-8336 •

Conclusiones

Este trabajo tomó los índices más bajos de disponibilidad energética del INEGI para seleccionarlos con prioridad en la exploración del potencial energético undimotriz, y proporcionar una alternativa viable para diseñar una micro-red que le suministre energía; los resultados obtenidos con un solo grado de libertad, movimiento vertical de una boya, son viables, pues se lograron estimaciones de potencia mayores a 0.5 MW, propios para energizar localidades pequeñas; el estudio estima la potencia máxima de cada nodo seleccionado, revelando a los nodos ubicados en las costas del océano Pacífico con mayor potencial undimotriz propicio para redes eléctricas de 1 MW. Llano Real, en Guerrero, es la comunidad cercana al nodo con ese nivel de energía; el nodo con 11 m de profundidad cercano a la comunidad de Champotón, en Campeche, presentó los niveles más bajos de estimación de potencia 1.5 kW, dejando al descubierto que la profundidad es un parámetro importante para la extracción de energía debido a que influye en la amortiguación de la ola, menor profundidad, mayor amortiguación, menor tamaño y poca disponibilidad para absorber la potencia por parte del cuerpo rígido. El estudio hecho también determinó las alturas significativas promedio y periodicidad de las olas, parámetros propios para el diseño del generador eléctrico lineal capaz de realizar la conversión de energía. Oleaje con alturas significativas mayores a 1 m tienen un potencial energético viable, además de indicar que la carrera del pistón del generador eléctrico lineal tendrá que ser mayor o igual que este valor de altura significativa. El oleaje con periodicidad promedio de 10 s parece ser conveniente de acuerdo con los resultados de potencia; esto significa que el generador eléctrico lineal tendrá frecuencia de operación de 1 Hz o menor para la extracción óptima de potencia. El diseño del generador eléctrico lineal se desarrolla en una segunda etapa de la investigación, realizando la simulación electromagnética para verificar los niveles de potencia estimados por el método analítico presentado en este documento.

Agradecimientos

La doctora Xiomara González Ramírez participó en una etapa del programa del Fondo Sectorial Conacyt-Sener-Sustentabilidad Energética, por lo que agradece el apoyo brindado para la realización de esta etapa de investigación; asimismo agradece al doctor Rodolfo Silva-Casarín por su valiosa plática y asesoría sobre el tema undimotriz.

Referencias

Cenace (2015). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista-PRODESEN 2015-2029*. Recuperado de http://www.cenace.gob.mx/Docs/MarcoRegulatorio/Ampliaci%C3%B3n%20y%20Modernizaci%C3%B3n%20RNT-RGD%202015-2029.pdf.

Carnegie Wave Energy Limited (2017). *Current projects*. Recovered from https://www.carnegiece.com/project/garden-island-microgrid-project/ .

Duckers, L. (2000). Wave power. *Engineering Science and Education Journal*, *9*(3), 113-122, DOI: 10.1049/esej:20000303.

EMEC (2016). *Wave developers*. Recovered from http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/.

ERDDAP (2016). *Easier access to scientific data*. Recovered from http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/index.html.

Falcão, A. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(3), 899-918.

Falnes, J. (2004). *Ocean waves and oscillating systems* (2a ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Elsevier Marine Structures*, *20*(4), 185-201.

Falnes, J., & Hals, J. (2012). Heaving buoys, point absorbers and arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 246-277, DOI: 10.1098/rsta.2011.0249.

FORTUM (2015). *Wave power plant on the west coast of Sweden*. Recovered from http://www.fortum.com/en/energy-production/wave-power/pages/default.aspx.

Frankfurt School (2016). *Global trends in renewable energy investment 2016*. Recovered from http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2016.

García, F. J. A., Castro, L. M., & Cerdá, E. (2012). Las energías renovables en el ámbito internacional. *Cuadernos Económicos de Ice*, (83), 11-36. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3955024.

González, X., Barrios, H., & Hernández, I. (septiembre, 2016). Wave energy conversion assessment at Mexican seaside points. *2016 IEEE PES Transmission & Distribution*

Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), Morelia, Mexico.

Google Earth (2016). *Mapa de los mares mexicanos*. Recuperado de https://www.google.com/earth/.

Hernández, I., Segundo, J., Gonzalez, X., Luna, D., & Juarez, Z. (2017). Performance and power quality assessment of a linear electric generator focused on microgeneration applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, DOI: 10.1002/etep.2326.

INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010* (archivo de datos). México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=pob&c=1.

INEGI (2015a). *Encuesta Intercensal 2015* (archivo de datos). México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/default.aspx.

INEGI (2015b). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015: Estados Unidos Mexicanos* (archivo de datos). México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www3.inegi.org.mx/sistemas/componentes/previsualizador/vista.aspx?arch=/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825078966.pdf&tipo=1.

Ippen, A. T. (1966). *Estuary and coastline hydrodynamics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.

López, J., Silva, R., & Mendoza, E. (2011). Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el hidrogenerador Impulsa. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *2*(4), 97-110.

MacDonald, J. (enero, 2016). Clean energy defies fossil fuel price crash to attract record $329bn global investment in 2015. *Bloomberg New Energy Finance*. Recovered from http://about.bnef.com/press-releases/clean-energy-defies-fossil-fuel-price-crash-to-attract-record-329bn-global-investment-in-2015/.

NOAA (2016). *Bathymetry and global relief* (base de datos en línea). Boulder, US: National Oceanic and Atmospheric Administration. Recovered from https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html..

OWET (2016). *Sweden gets grid-connected wave energy plant.* Recovered from http://oregonwave.org/news/sweden-gets-grid-connected-wave-energy-plant/.

Parkinson, G. (octubre, 2017). Carnegie turns wave energy focus to Albany after winning W.A. grant. *RenewEconomy.* Recovered from http://reneweconomy.com.au/carnegie-turns-wave-energy-focus-albany-winning-w-grant-79310/

Pérez, A. I. (2012). *Estimación del clima marítimo y la energía de oleaje disponible en las costas mexicanas*. Tesis de maestría. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Piesse, E. (octubre, 2015). World-first wave power microgrid to be trialled in WA. *Western Australia.* Recovered from http://www.abc.net.au/news/2015-10-29/world-first-wave-power-microgrid-to-be-trialled-in-wa/6896994.

REN21 (2015). *Renewables 2015 global status report. Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2015.* Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Recovered from http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_Key-Findings_SPANISH.pdf.

REN21 (2016). *Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial.* Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Recovered from http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf.

REVE (enero, 2016). Inversión de energías renovables en México. *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico*. Recuperado de http://www.evwind.com/2016/01/23/inversion-de-energias-renovables-en-mexico/.

Rogers, W. E., Dykes, J. D., Wang, D., Carroll, S. N., & Watson, K. (2012). *Validation Test Report for Wavewatch III* (NRL/MR/7320--12-9425). Naval Research Laboratory, Oceanography Division, Stennis Space Center, MS 39529-5004. Recovered from http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA576706.

Sener (2012). *Prospectivas de energías renovables 2012-2026*. México, D.F.: Secretaría de Energía. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf.

Sener (2015). *Prospectivas de energías renovables 2015-2029.* México, D.F.: Secretaría de Energía. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf.

Sierra, J., Mösso, C., & González, D. (November, 2014). Wave energy resource assessment in Menorca (Spain). *Renewable Energy*, 71, 51-60. Recovered from https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.017.

Tolman, H. L. (2009). *User manual and system documentation of Wavewatch IIITM version 3.14.* (Technical Note 276). National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. Recovered from http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn276/MMAB_276.pdf.

WMO (1998). *Guide to wave analysis and forecasting* (WMO-No. 702). World Meteorological Organization. Recovered from https://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/WMO%20No%20702/WMO702.pdf.

Dirección institucional de los autores

Dra. Xiomara González Ramírez
Dr. Iván Abel Hernández Robles

Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías CIS
Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5+1.8
36885 Salamanca, Guanajuato, México

Teléfono: +52 (464) 6479 940
x.gonzalez@ugto.mx
ia.hernandez@ugto.mx

Dr. Héctor A. Barrios Piña

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Avenida General Ramón Corona 2514, Nuevo México
45201 Zapopan, Jalisco, México
Teléfono: +52 (33) 3669 3000, ext. 2300
hector.barrios@itesm.mx

• ISSN 0187-8336